

RAPPORT D'ETUDE N° 009/86

LES MAREGRAPHES

Par l'I.C.S.C. SIMON Bernard

Septembre 1986

Texte de l'exposé fait le 12 juin 1986 au Comité National Français de Géodésie et Géophysique lors de la journée d'étude sur le Niveau Moyen des Mers.

Section Océanographie

N° 368 EPSIOM/E/OC/NP
du 19 septembre 1986

FICHE DOCUMENTAIRE

RAPPORT D'ETUDE N° : 009/86	
TITRE : LES MAREGRAPHES	
AUTEUR (S) : I.C.S.C. SIMON Bernard	
DATE : Septembre 1986	Nombre de pages : 21. + annexe + bibliographie
Organisme origine : EPSHOM Section Océanographie 13, rue du Chatellier B.P. 426 Adresse : 29275 BREST CEDEX	
Numéro et date attribués par l'organisme origine : 368 EPSHOM/E/OC/NP du 19.09.86	numéro du contrat d'étude :
Objet de l'étude :	
Mention de protection : Non protégé	
Diffusion (externe, interne, réservée) : Externe et interne	
Publication :	
Observations diverses : Texte de l'exposé fait le 12 juin 1986 au Comité National Français de Géodésie et Géophysique lors de la journée d'étude sur le Niveau Moyen des Mers	
Mots clés : MAREGRAPHE - MAREE - NIVEAU MARIN - TRAITEMENT - ACQUISITION - PREDICTION - ORGANISME INTERNATIONAL - BANQUE DE DONNEES	
RESUME : Présentation de l'état actuel de la mesure marégraphique dans le monde, de ses applications et de son évolution liée à des besoins nouveaux de données précises.	

S O M M A I R E

	Page
Introduction	2
I - Les instruments	3
1) Marégraphes à flotteur	3
2) Marégraphes à pression	4
3) Acquisition des enregistrements	6
3.1. Marégrammes	
3.2. Contrôles	
3.3. Numérisation	
3.4. Numérisation directe	
4) Evolution de la mesure marégraphique	8
II - Exploitation des données	11
1) Navigation	11
2) Bathymétrie	11
3) Prédiction	12
4) Etudes	13
4.1. Etudes océano-climatiques	
4.2. Construction d'ouvrages	
4.3. Modèles	
4.4. Niveau moyen des mers	
4.5. Amélioration des prédictions	
4.6. Projets	
5) Réseaux d'alertes	15
6) Système Mondial Intégré de Services Océaniques	15
III - Les réseaux	16
1) Le réseau mondial	16
2) Le système international d'alerte aux tsunamis	17
3) Le réseau d'alerte aux ondes de tempête	17
IV - Les centres de données	19
1) Banques nationales, EPSHOM	19
2) Permanent Service for Mean Sea Level	19
3) Banque de données de OHI	20
Conclusion	21

Introduction

La marégraphie a pour objet la mesure du niveau de la mer, influencé non seulement par le phénomène des marées, mais aussi par la houle, les seiches, les tsunamis, les perturbations à très basse fréquence d'origine climatique, etc...

Le mot "marégraphie" est donc utilisé par commodité et pour ne pas s'éloigner de l'usage, même si lon vise à étudier des phénomènes qui ne sont pas de la marée.

Ces phénomènes occupent un domaine de fréquence très vaste, les périodes s'étendant de quelques minutes pour les seiches à plusieurs dizaines d'années, voire de siècles, pour les variations d'origine climatique.

I - LES INSTRUMENTS

1) Marégraphe à flotteur

Le marégraphe à flotteur peut être appelé le marégraphe traditionnel car il est utilisé depuis plus d'un siècle et même aujourd'hui, c'est de loin le plus répandu.

Une enquête faite par la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) en 1984 auprès des organismes susceptibles d'entretenir des stations marégraphiques a permis de recenser plus de 700 marégraphes permanents actuellement en fonctionnement dans le monde (ce nombre est vraisemblablement très inférieur à la réalité), dont 94 % sont des marégraphes à flotteur de 29 marques et modèles différents.

Dans ce type d'appareil, les variations de hauteur d'un flotteur sont transformées par l'intermédiaire d'un fil et d'engrenages démultiplicateurs à un style qui permet l'enregistrement sur un tambour animé d'un mouvement de rotation régulier. La tension du fil est assurée par un contrepoids ou un ressort. On obtient ainsi une représentation analogique de la hauteur en fonction du temps. Généralement, le tambour fait un tour complet en 24 h, plus rarement en une semaine.

Les appareils les plus modernes permettent en outre une numérisation sur support informatique (généralement une bande perforée).

Le flotteur est situé dans un puits de tranquillisation relié à l'extérieur par un petit orifice.

Cet orifice a pour rôle de filtrer les vagues. Le puits est généralement surmonté d'un abri et le tout constitue une protection efficace des installations contre les intempéries.

Les marégraphes à flotteur sont généralement fiables et, étant peu sophistiqués si une grande précision n'est pas nécessaire, ils ne requièrent pas un personnel très qualifié pour l'entretien et la mise oeuvre. Cependant ils souffrent d'un certain nombre de défauts associés au puits de tranquillisation, au mécanisme et à la numérisation des marégrammes.

La hauteur d'eau dans le puits devrait être la même qu'à l'extérieur. En pratique cependant, le puits de tranquillisation ne constitue pas un filtre linéaire. Sa réponse dépend non seulement de facteurs tels que les dimensions relatives du puit et de l'orifice, la taille du flotteur, la forme de l'orifice, mais aussi de la présence ou l'absence de vagues, de courant, de la différence de densité entre l'intérieur et l'extérieur du puits, du fouling ou d'envasement au niveau de l'orifice.

Les oscillations de pression dues à la présence de vagues peuvent provoquer un abaissement du niveau à l'intérieur du puits qui peut atteindre 10 à 15 cm pour des vagues importantes. De même, un courant perpendiculaire à l'axe de l'orifice provoque un abaissement du niveau qui peut atteindre 18 cm pour un courant de 1,5 m/s (Lennon 1971).

Au cours d'un cycle de marée, la température et la salinité des eaux côtières peuvent changer de façon importante particulièrement près de l'embouchure des cours d'eau. Le fait que la communication ne s'effectue que par un petit orifice peut empêcher le complet renouvellement de l'eau. Dans une rivière à marée, la densité à l'intérieur du puits est inférieure à la densité à l'extérieur. On a pu constater des écarts en hauteur supérieurs à 6 cm à cause de ce phénomène.

Enfin les salissures par développement de la vie marine (fouling) ou l'engorgement peuvent altérer sérieusement les caractéristiques du filtre ; ce défaut n'est souvent détecté que lorsqu'il devient flagrant. Il est la cause de la perte de nombreuses observations.

2) Marégraphes à pression

Certains sites ne sont pas adaptés à l'installation d'un marégraphe à flotteur parce qu'ils ne possèdent pas de structure verticale permettant d'installer le puits de tranquillisation.

Par ailleurs, parce qu'ils sont coûteux à installer, les marégraphes à flotteurs ne sont pas adaptés à des observatoires temporaires. Pour ces raisons, les marégraphes à capteurs de pression sont particulièrement utiles. Il existe différentes méthodes pour mesurer la pression, la plus utilisée étant le marégraphe pneumatique à échappement continu. Il a pour principe la mesure de la pression (généralement de l'azote) dans un tuyau dont une extrémité est sous l'eau, alimenté en gaz de façon à équilibrer exactement la hauteur d'eau.

Les marégraphes à échappement continu ne sont pas confrontés aux problèmes rencontrés avec le puits de tranquillisation mais d'autres sources d'erreur apparaissent, associées principalement à l'agitation de surface, aux variations de densité de l'eau et aux pertes de charge dans le tuyau.

En présence de vagues, la pression de l'eau au niveau de l'orifice change constamment. Si le débit n'est pas suffisant, une augmentation rapide de pression peut provoquer une remontée d'eau dans le tube, provoquant une diminution apparente de la hauteur d'eau mesurée. Ce défaut est partiellement corrigé en ménageant à l'orifice, une cavité dont le volume est comparable au volume du tuyau.

Cependant, avec ce système, les sites où les vagues peuvent être importantes doivent être évités.

La hauteur d'eau mesurée étant fonction de la pression au niveau de l'orifice, les variations de la densité peuvent engendrer des erreurs. On devra éviter d'installer ces appareils à proximité de l'embouchure des cours d'eau.

La perte de charge dans le tuyau est une autre source d'erreur, d'autant plus importante que le débit est important. Un compromis doit être trouvé entre les erreurs liées à l'agitation de surface et les erreurs liées aux pertes de charge. Ce problème est d'autant plus important que le tuyau est long. En pratique, on évite les tuyaux de longueur supérieure à 200 m.

Ces appareils peuvent donner de bons résultats, mais au prix d'un effort soutenu de contrôles et de calibration. Leur emploi devrait être déconseillé aux organismes dépourvus des structures nécessaires.

Les marégraphes à jauge de contrainte fonctionnent sur le principe selon lequel la résistance électrique d'un conducteur ou un semi-conducteur varie lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique.

Les appareils modernes emploient des semi-conducteurs montés sur des diaphragmes. Lorsque le diaphragme est soumis à des variations de pression résultat des variations de hauteur d'eau, il transmet ses déformations en semi-conducteur. Il en résulte une variation de la résistance qui peut être mesurée. Ces appareils sont très sensibles à la température et subissent souvent une dérive importante. Ils ne permettent une mesure précise qu'au prix d'une calibration très soignée effectuée périodiquement. Un capteur de température doit être situé à proximité du capteur de pression afin d'effectuer les corrections. Ils présentent l'avantage d'être bon marché.

Dans les capteurs de pression à quartz, on mesure les variations de la fréquence de résonance des cristaux de quartz lorsqu'ils subissent des variations de pression. Ils permettent des mesures précises, sont beaucoup moins sensibles à la température et dérivent beaucoup moins que les jauges de contrainte. Ils sont utilisés dans les marégraphes de grande profondeur car ils sont capables d'une résolution du millimètre à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres.

La maintenance de ces appareils et leur calibration requiert un personnel très qualifié. Leur principal inconvénient est leur prix élevé.

3) Acquisition enregistrement

3.1. Marégrammes

La méthode la plus répandue d'enregistrement marégraphique est le graphe de la hauteur en fonction du temps, appelé marégramme, dessiné par un style sur une feuille de papier graphique.

Le style est solidaire du flotteur ou du capteur de pression par l'intermédiaire d'un système de démultiplication, déterminant l'échelle des hauteurs. Le temps est obtenu par la rotation du tambour sur lequel est fixé la feuille, à l'aide d'un mouvement d'horlogerie.

Le tambour fait généralement un tour en 24 heures. La feuille peut alors rester deux semaines en place sans qu'il y ait risque de chevauchement (mais il est cependant recommandé de la changer toutes les semaines).

Plusieurs sources d'erreurs sont attachées à ce système :

- mesure de la hauteur : mauvais calage au départ ou inexactitude de l'échelle de hauteur due à une variation de dimension de la feuille sous l'effet des variations d'humidité ou de température.

Mesure du temps : mauvais calage au départ (résultat souvent du rattrapage du jeu), inadaptation de la feuille au support causant une variation cyclique de l'échelle du temps, variation importante de la marche de l'horloge ou défaut des engrenages d'entraînement du tambour faisant varier sa vitesse de rotation.

Chacun de ces défauts peut être important. Tous peuvent être corrigés à l'aide de contrôles réguliers effectués avec soin. Ils sont obligatoirement effectués au moment des changements de feuille, mais il est recommandé de les effectuer un minimum de deux fois par semaine.

3.2. Contrôles

a) *Contrôle de la hauteur*

- A l'extérieur du puits, c'est la seule méthode permettant de détecter certaines anomalies causées par le puits. Il ne peut être fait, pratiquement qu'à l'aide d'une échelle graduée lue à distance. A cause des clapotis et des vagues, la précision ne peut guère être meilleure que 5 cm.

- A l'intérieur à l'aide d'une sonde lumineuse, nettement plus précise (1 cm) ; mais on ne contrôle alors qu'une partie de l'installation : le marégraphe proprement dit. Il est donc préférable de procéder à ces deux contrôles. Les lectures à l'échelle, à la sonde lumineuse et sur le marégramme doivent être transcrites à chaque contrôle sur un imprimé spécial, un cahier, ou à défaut sur le marégramme lui-même.

Le contrôle du nivellement n'est que très rarement pratiqué.

b) *Contrôle de l'heure*

Il consiste en une comparaison de l'heure indiquée par le style sur le marégraphe et de l'heure de la montre de l'observateur (supposée exacte). Ces deux lectures sont transcrites sur le document de contrôle.

Les erreurs de calage en temps sont très gênantes lors de l'utilisation des observations pour en déduire des prédictions. Les défauts se traduisant par une variation cyclique de l'échelle des temps (élongation de la feuille, défaut des engrenages) sont difficiles à mettre en évidence lors des observations et ne font généralement pas l'objet de contrôles. Ils sont en revanche aisément détectés lors des analyses faites à l'EPSHOM qui peut alors les signaler aux organismes responsables des observations.

3.3. Numérisation des marégrammes

Tout traitement informatique suppose la numérisation des marégrammes. On prélève généralement une hauteur à chaque heure ronde, cadence généralement suffisante pour les analyses de marée. Ce travail est actuellement facilité dans les centres ayant à traiter de nombreux marégrammes, par une table à numériser, permettant de saisir directement sur support informatique chaque hauteur pointée par l'opérateur.

Une source d'erreur non négligeable provient de l'interprétation des feuilles de contrôle si celles-ci n'ont pas été remplies avec tout le soin nécessaire.

Un autre défaut de la numérisation manuelle ou semi-automatique des marégrammes est le caractère routinier et peu gratifiant de ce travail, qui peut engendrer un manque de motivation, lui-même générateur d'erreurs.

3.4. Numérisation directe

Les inconvénients liés à la numérisation manuelle des marégrammes, résultant de la nécessité de disposer des données numérisées sur support informatique ont entraîné naturellement des réalisations de système de numérisation directe de la donnée. Les marégraphes à flotteur ont d'abord été équipés de codeurs et enregistreurs à bande perforée, encore très répandus (mais sur le point d'être réformés). Des essais d'un tel matériel effectués en France au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine se sont soldés par un échec en raison du taux de panne trop élevé du matériel proposé.

La numérisation passe nécessairement par un codage du signal analogique qui peut être réalisé de diverses manières, l'une des plus sûres étant le codage optique de la rotation d'un disque solidaire de la poulie entraînée par le flotteur. Un autre système, plus répandu, mais probablement moins fiable utilise un potentiomètre dont la tension sur le curseur est transformée en fréquence. Ces impulsions sont comptées pendant une période de temps précise et le résultat de ce comptage est ensuite codé en binaire.

Des réalisations de ce type existent qui donnent de bons résultats après une période inévitable de mise au point.

La numérisation directe est plus courante sur les capteurs de pression à échappement continu et c'est généralement le seul enregistrement disponible sur les capteurs à quartz ou jauge de contrainte.

4) Evolution de la mesure marégraphique

L'état actuel de la mesure marégraphique n'est pas satisfaisant. On constate en effet une détérioration de la qualité de la mesure, que l'on doit vraisemblablement attribuer au caractère désuet de la technique mise en jeu, entraînant le désintérêt des opérateurs pour un travail routinier et fastidieux que pourrait accomplir une machine. On constate que, par exemple à Brest, les observations effectuées au siècle dernier sont de meilleure qualité que les observations modernes.

Par ailleurs, certains programmes de recherche (mesures altimétriques, calages de modèles de marée, études des variations de niveau moyen) exigeront dans les années à venir une précision hors de portée des appareils actuels. Enfin le coût des pannes et des interventions humaines est en général très élevé, même s'il n'est pas clairement reconnu. Le remplacement de certaines installations anciennes pourrait être justifié par la plus grande fiabilité et la plus grande autonomie d'appareils plus modernes.

Il est peu de domaines où s'offre un si grand choix de techniques de mesure. Un inventaire très complet en a été dressé dans une étude américaine faite pour le compte du Naval Oceanographic Survey en vue de remplacer le réseau actuel de marégraphes américains. Il en ressort que la mesure acoustique dans l'air est la méthode qui devrait permettre de satisfaire la plupart des exigences pour le prix le plus bas (ce prix comprend l'acquisition, l'exploitation et la maintenance pour une durée de 20 ans). Il est vrai que dans cette étude les exigences ne sont pas très sévères puisqu'une précision de 2 % est considérée comme suffisante alors que quelques applications exigent une précision meilleure que 1 %. Il est possible que l'on doive s'orienter vers l'utilisation de deux types de marégraphes, l'un rustique et relativement bon marché, donnant une précision suffisante pour la grande majorité des applications, équipera la plupart des observatoires tandis que l'autre beaucoup plus précis équipera quelques stations sélectionnées. Pour ces dernières, malgré les défauts qui ont été énumérés ci-dessus, il est possible que l'on puisse retenir la solution du flotteur dans un puits de tranquillisation, à condition que le site soit choisi avec soin (absence de courant de houle, de variations de densité au cours du cycle de marée).

Un marégraphe à flotteur dérivé d'un jaugeur destiné à mesurer les hauteurs d'hydrocarbure dans les cuves a été expérimenté avec succès dans le puits du marégraphe de Brest. L'EPSHOM envisage d'en faire une expérimentation de longue durée après modification du système d'enregistrement. Une précision de 1 cm sur 20 m devrait pouvoir être obtenue sans grande difficulté. L'EPSHOM va également étudier un marégraphe acoustique.

Concernant l'enregistrement, plusieurs systèmes peuvent être mis en concurrence :

- L'enregistrement sur cassette présente l'avantage d'être répandu sur les micro-ordinateurs et de permettre moyennant la programmation du logiciel et l'interfaçage avec un capteur, de constituer à peu de frais un système complet. Ses défauts sont son relatif manque de fiabilité, et sa consommation qui le font de plus en plus considérer comme une technique dépassée.

L'enregistrement sur mémoire RAM selon la technique CMOS est utilisé dans les marégraphes plongeurs fabriqués par la société SUBER. Cette technique a jusqu'à présent donné toute satisfaction à l'EPSHOM où ces marégraphes ont déjà fourni de nombreuses mesures de bonne qualité. Elle présente l'inconvénient d'être tributaire d'une alimentation dont la coupure accidentelle entraînerait la perte des données. Un avantage de ce procédé est sa souplesse. Il permettrait par exemple de vider les mémoires à intervalles réguliers par télétransmission (ARGOS).

- Les mémoires EPROM ne peuvent être effacées que par un appareil à ultra-violet, ce qui leur confère une sûreté d'utilisation supérieure, mais obtenue au détriment de la souplesse : L'intervention d'un opérateur est nécessaire pour charger périodiquement les cartes-mémoire. C'est la solution préconisée par le NOS.

- Les mémoires à bulles pourraient devenir compétitives pour cette application si la plage de températures d'utilisation est suffisante : il est nécessaire qu'elles acceptent des températures inférieures à 0 C, ce qui n'est, semble-t-il pas toujours le cas.

II - EXPLOITATION DES DONNEES

La connaissance précise des hauteurs d'eau, particulièrement près des côtes, constitue une donnée importante pour la navigation et l'étude des océans. Il est intéressant de noter que les divers types d'utilisation se distinguent par les gammes de fréquence concernées, par la précision requise et par les modalités d'exploitation de l'information.

1) Navigation

C'est l'utilisation la plus ancienne de l'information marégraphique traditionnellement assurée soit par des échelles de marées disposées à l'entrée des ports ou le long des chenaux, dans les parties maritimes des fleuves soit, dans les ports importants par des signaux effectués de jour par un jeu de cônes et de cylindres, de nuit par un jeu de feux verts rouges et blancs.

Des réalisations plus modernes ont été développées, notamment en France dans les ports autonomes de Bordeaux, Nantes et Rouen : les hauteurs d'eau à différents marégraphes sont transmises aux bateaux en phonie par VHF.

La caractéristique principale de cette application est l'accessibilité à la mesure en temps réel ou très peu différé.

Une incertitude sur les hauteurs d'eau se répercute entièrement sur les pieds de pilote. En raison des coûts d'exploitation des gros navires (une attente sur rade et très onéreuse) et de la nécessité de rentabiliser les installations portuaires, les pilotes et les autorités portuaires sont de plus en plus exigeantes sur la qualité des mesures marégraphiques. Les ports autonomes de Rouen et Bordeaux exigent une précision de la mesure de hauteur instantannée meilleure que 5 cm.

2) Bathymétrie

Les sondages effectués pour élaborer les cartes marines doivent être corrigés de la marée. On utilise généralement pour cela des marégraphes portatifs disposés sur la côte.

Au SHOM on utilise depuis longtemps des marégraphes à flotteur qui présentent l'inconvénient d'exiger pour leur installation une structure fixe verticale, exigence qui peut s'avérer incompatible avec la proximité de la zone de sondage. Par ailleurs, ces mesures s'avèrent souvent de qualité médiocre. Dans d'autres services hydrographiques, on utilise des marégraphes à échappement continu pour lesquels le choix du site est moins contraignant, mais dont la mise en oeuvre dans les missions hydrographiques pour obtenir des mesures de qualité ne peut pas toujours être effectuée avec le soin nécessaire.

Depuis quelques années, le SHOM utilise de plus en plus pour cette application des marégraphes plongeurs à mesure de pression. Le rattachement au réseau de nivellement est obtenu par quelques lectures d'une échelle de marée disposée à proximité. Pour les sondages éloignés de la côte, ces marégraphes servent également à mesurer la marée sur zone. Un inconvénient de cet appareil est la nécessité d'effectuer la correction de pression atmosphérique. Par ailleurs, il interdit l'accès en temps réel à la mesure, ce qui pourrait parfois être utile et permettrait de contrôler son bon fonctionnement. Le besoin se fait sentir de la conception d'un appareil destiné à cette application, dont les caractéristiques principales seraient la robustesse, la facilité de mise en oeuvre (peu exigeant sur le choix du site et facilement transportable), l'accès à la mesure en temps réel (avec possibilité de télétransmission). Une précision globale de 5 cm serait suffisante.

3) Prédiction

Pour calculer les annuaires de marée, il est nécessaire de disposer de données marégraphiques de qualité. Des erreurs systématiques dans les observations, résultant par exemple de mauvais calages en heure ou en hauteur peuvent affecter gravement la précision de la prédiction.

Une année d'observations horaires est généralement suffisante pour une bonne analyse harmonique (permettant une précision suffisante pour les besoins de la navigation). Dans les zones d'estuaire ou lorsque l'onde marée a progressé sur des zones étendues peu profondes (Manche Est), le calcul de certaines composantes harmoniques d'interaction non linéaire qui peuvent alors devenir importantes exige quatre années d'observations.

On considère généralement que 19 années permettent dans tous les cas une analyse optimale, mais il très rare de disposer de données marégraphiques de bonne qualité sur d'aussi longues périodes.

Il est parfois possible de se contenter de durées d'observations inférieures à une année, par exemple lorsque l'amplitude de la marée est si faible qu'une prédiction même imprécise est suffisante ou lorsque la proximité d'un port où une prédiction précise est possible, permet l'utilisation de constantes de rattachement (corrections d'heure et de hauteur pour diverses amplitudes de marée.). Un mois d'observation peut alors s'avérer suffisant, mais à condition que les mesures soient de très bonne qualité. On préférera alors les observations faites en été, moins perturbées par les variations de niveau d'origine météorologique.

Les observations horaires permettent d'explorer le spectre de fréquence jusqu'aux douzièmes diurnes, ce qui est amplement suffisant dans la grande majorité des cas. Cependant, pour certaines marées fluviales des cadences d'échantillonnage plus rapides peuvent être nécessaires. A Bordeaux, par exemple des raies spectrales sont encore perceptibles au-delà des 30e diurnes.

4) Etudes

Diverses études sont menées à partir des données marégraphiques. Du point de vue de l'observation, elles se distinguent par le domaine de fréquences concernées, par les exigences en précision et par les durées requises.

4.1. Etudes océano-climatiques

Le niveau marin local est affecté par des processus physiques étroitement interdépendants tels que la densité de l'eau (fonction de la température et de la salinité), les courants locaux, la circulation océanique, le vent, les vagues et la pression atmosphérique. Il comporte une signature de ces phénomènes qu'il peut de ce fait aider à étudier au moyen par exemple de méthodes d'analyses multispectrales sur des séries temporelles d'observations océanographiques et météorologiques.

4.2. Construction d'ouvrages

Les études de projets portuaires, d'ouvrages côtiers, de plates-formes pétrolières ont en commun la nécessité de connaître le niveau maximum susceptible d'être atteint par la mer sur des périodes très longues. Les hauteurs atteintes par la marée étant considérées comme connues, il convient d'étudier dans ce cas la probabilité d'apparition de surcotes (différence entre la hauteur observée et la hauteur prédite). De telles études sont faites par le Laboratoire National d'Hydraulique pour l'implantation de centrales électriques sur le littoral. Elles exigent de longues séries de mesures de bonne qualité.

4.3. Modèles

Le calage et la validation des modèles de propagation de la marée et des ondes de tempête requiert des mesures marégraphiques sur les limites, ce qui pour les limites ouvertes pose le problème de l'observation marégraphique au large, technique que nous commençons à maîtriser pour les zones de plateau (profondeurs inférieures à 200 m). Pour la modélisation océanique, une action est en cours dans le cadre d'un groupe de travail regroupant EPSHOM, IFREMER, IMG, ORSTOM et TAAF pour acquérir la maîtrise de l'observation marégraphique par grande profondeur.

4.4. Niveau moyen des mers

Le niveau moyen des mers peut par exemple fournir des informations fondamentales sur la circulation océanique ou sur le rôle climatique des océans. Mais le réseau mondial traditionnel d'observatoires de marée présente pour ces applications des défauts importants : il est inhomogène (concentration en Amérique du Nord, en Europe et au Japon) et mal adapté aux problèmes de l'océanographie. C'est pourquoi on a de plus en plus recours à l'implantation de marégraphes spécifiques pour ces applications.

Il est généralement admis que le niveau global des océans augmente de l'ordre de 1 à 2 mm par an, mais les estimations du taux d'augmentation diffèrent sensiblement suivant les auteurs. Cette différence dans les estimations traduit l'ignorance des causes exactes de ces variations et en particulier de la part à attribuer à l'effet de serre dû à l'augmentation du taux de gaz carbonique d'origine industrielle dans l'atmosphère. Une étude de ce problème nécessite le positionnement des marégraphes dans un repère absolu.

4.5. Amélioration des prédictions de marée

Les méthodes traditionnelles d'analyse et de prédiction sont mises en défaut dès que l'onde marée est très déformée par des processus non linéaires tels que les frottements sur le fond ou l'advection qui deviennent notables lorsque les variations de hauteur de marée sont comparables à la hauteur d'eau moyenne. Des méthodes de prédictions adaptées aux zones d'estuaire qui tiennent compte des variations de débit des cours d'eau sont utilisées. Elles doivent être adaptées à chaque cas à l'aide de séries d'observation de bonne qualité échantillonnées toutes les dix minutes pendant une année.

4.6. Projets

Il apparaît un besoin accru de données marégraphiques, lié en grande partie aux développements des techniques spatiales :

- exploitation des missions altimétrique par satellite ;
- surveillance géodésique des marégraphes ;
- études climatiques (TOGA, WOCE).

Il justifie la mise en place des programmes GLOSS sous l'égide de la COI ou GSLP sous l'égide de la NOAA.

Ces programmes prévoient le déploiement d'un réseau de marégraphes de part le monde pour pallier aux défauts du réseau actuel.

5) Réseau d'alerte

Des mesures marégraphiques sont utilisées pour avertir des cataclysmes naturels tels que les ondes de tempête et tsunamis. C'est ainsi qu'un réseau de marégraphes est installé sur les côtes orientales de Grande Bretagne afin d'avertir des risques d'ondes de tempête, particulièrement dangereux sur ces côtes et qu'un réseau destiné à avertir des tsunamis est déployé dans le Pacifique.

6) ISLPP

En 1984, le Comité de travail mixte COI/OMM pour le Système Mondial Intégré de Services Océaniques (SMISO) a lancé un projet pilote en vue de l'échange opérationnel des données relatives au niveau moyen de la mer dans l'Océan Pacifique (ISLPP). Il a pour objectif la production et la diffusion rapides des cartes mensuelles du niveau de la mer dans le Pacifique. Les cartes sont dressées régulièrement dans les quatre semaines suivant la fin de chaque mois.

Ce projet pilote a pour base l'université de Hawaï sous la direction du professeur Klaus Wyrtki, déjà responsable du Tsunami Warning System.

Il est prévu d'étendre le projet à d'autres régions de l'Océan Mondial.

III - LES RESEAUX

1) Le réseau mondial

Une enquête faite par la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) en 1982 a permis de recenser 743 marégraphes permanents actuellement en service dans le monde. 94 % sont des marégraphes à flotteur, 35 % fournissent les hauteurs d'eau sur support informatique directement assimilables par ordinateur, les autres fournissent des courbes analogiques dont 29 % sont numérisées automatiquement sur table de lecture, les autres étant dépouillées manuellement.

Cette enquête de la COI est très incomplète car par exemple, sur les 80 stations marégraphiques françaises recensées lors d'une enquête faite en 1984, elle n'en a citée que 17 (même si quelques observatoires récents ne pourraient alors lui être connus). Elle comporte par ailleurs un certain nombre de lacunes flagrantes. Ce sont par exemple l'absence de stations en Union Soviétique, en Allemagne de l'Ouest ou en Italie, alors que nous savons que ces pays entretiennent des stations marégraphiques permanentes.

Malgré ses insuffisances, cette enquête met en évidence le caractère essentiel de l'implantation des marégraphes côtiers : la très forte densité dans les zones économiquement développées (Japon, Amérique du Nord, Europe, Australie) contrastant avec la très grande rareté dans d'autres régions.

A une autre échelle, la même constatation peut être faite concernant l'implantation des marégraphes en France : on les trouve en grande quantité dans les zones portuaires importantes (Rouen-Le Havre, Nantes-St Nazaire, Marseille-Fos) alors que d'autres régions en sont pratiquement dépourvues.

Remarquons par exemple que le seul marégraphe du golfe Normand-Breton, où les amplitudes de marées figurent parmi les plus fortes du monde, est celui de St Servan exploité par l'EDF, pour l'usine marémotrice de la Rance. Très proche du barrage, les mouvements du plan d'eau y sont probablement influencés par le fonctionnement de l'usine.

Cette concentration de stations marégraphiques dans les zones portuaires importantes, démontre l'importance de la connaissance précise de la marée pour la navigation. Mais pour d'autres applications (études climatiques, constructions d'ouvrages, recherches pétrolières, modélisation) la répartition des stations marégraphiques s'avère généralement inadaptée.

Il existe actuellement deux grands réseaux de marégraphes déployés pour des raisons autres que la navigation. Ce sont le réseau d'alerte aux Tsunamis exploité par l'Université de Hawaï et le réseau d'alerte aux ondes de tempêtes exploité par l'Institut of Oceanographic Sciences (Bidston - UK).

2) Le système international d'alerte aux Tsunamis

Le Tsunami Warning System a été créé en 1948 par l'United State Coast and Geodetic Survey afin de fournir des renseignements fiables aux îles Hawaï et aux forces américaines disséminées dans le Pacifique sur les risques de Tsunami. La décision a fait suite aux dégâts causés à Hawaï par un important Tsunami en 1946. Deux autres Tsunamis destructeurs ont eu lieu en mai 1960 et en mars 1964, montrant le besoin d'un réseau d'alerte international à l'usage de tous les pays du Pacifique. Afin de répondre à ce besoin, les Etats Unis ont offert d'étendre leur système d'alerte, ce qui se traduit en 1965 par la création de l'International Tsunami Information Center (ITIC) et du groupe de coordination regroupant 22 pays membres du système sous l'égide de l'UNESCO (COI). L'observatoire de Honolulu devint le centre opérationnel du Tsunami Warning System (TWS). Le TWS est composé de 32 stations sismiques et de 58 stations marégraphiques. Chaque fois qu'un évènement sismique risquant de générer un Tsunami se produit, il est demandé aux stations marégraphiques les plus proches de l'épicentre d'examiner soigneusement les enregistrements marégraphiques et d'informer le TWS de la détection éventuelle d'un tsunami.

Il est évidemment essentiel que les stations du réseau soient aptes à fournir des renseignements fiables dans des délais très brefs : elles doivent fonctionner en permanence et disposer d'un système de communication rapide et sûr avec le TWC.

3) Réseau d'alerte aux ondes de tempête

Une onde de tempête destructrice en 1953 a mis en évidence l'inadaptation du réseau de marégraphes britannique à ce genre de phénomène : d'une part, il n'a pas permis de donner l'alerte, d'autre part, il a été en grande partie détruit.

Cet évènement a été le point de départ d'un effort de modernisation du réseau afin de l'adapter aux besoins de la recherche océanographique, de l'analyse et la prédiction, de l'étude des variations de niveau moyen et surtout de l'alerte aux ondes de tempête, en plus des besoins traditionnels liés à la navigation. Ce n'est cependant qu'à partir de 1976 que des progrès notables ont été permis grâce à un accroissement de l'effort financier de la part de certaines administrations. Un comité chargé des marégraphes a été créé, dont les actions principales ont été les suivantes :

- définition d'un réseau officiel de stations marégraphiques ;
- publication de manuels pour les spécifications, l'installation, la maintenance et l'observation ;
- étude et amélioration des performances des installations en liaison étroite avec les activités locales responsables de la mesure ;

- un effort particulier a été consacré aux marégraphes du réseau d'alerte aux ondes de tempête qui ont été dotés d'un système de transmission de telle sorte qu'un double de l'enregistrement marégraphique soit disponible au quartier général du Service à Bracknell. Ainsi la progression des ondes de tempête dans la Mer du Nord peut être suivie en temps réel, et servir de base à une prédiction.

Des marégraphes interrogeables à distance ont aussi été installés dans le même but, dont l'un sur une plate-forme pétrolière.

Il a été créé récemment, à l'I.O.S. une inspection des marégraphes avec deux officiers chargés de la liaison avec les autorités locales et responsables de la maintenance du réseau.

Des problèmes demeurent liés à la mauvaise qualité de certaines installations (mauvaise précision, taux de panne élevé), mais grâce à l'efficacité de l'organisation mise en place ces dernières années, qui traduit une réelle volonté d'aboutir, ils devraient être résolus rapidement.

IV - LES CENTRES DE DONNEES

Les enregistrements de données marégraphiques dont un grand nombre portent sur plus d'une centaine d'années figurent parmi les séries de mesures les plus longues dont on dispose.

1) Banques nationales de données - EPSHOM

Les banques de données marégraphiques sont généralement gérées par les Services Hydrographiques nationaux.

En France et dans les Territoires et Départements d'Outre-Mer, les observatoires ont généralement été mis en place récemment, mais en de nombreux sites, des observations anciennes existent, faites parfois au siècle dernier, parfois durant des dizaines d'années (Le Havre, Cherbourg, St Malo...).

Beaucoup ont malheureusement disparu.

Les observations disponibles les plus anciennes que nous connaissions ont été faites à Brest de 1714 à 1717, mais il est malheureusement impossible de retrouver le niveau de référence utilisé, donnée indispensable pour l'étude des variations de niveau moyen.

Nous possédons des enregistrements analogiques à Brest depuis 1860 avec quelques lacunes peu importantes, si l'on excepte la période comprise entre 1945 et 1953 (marégraphe détruit lors des bombardements de Brest). Toutes ont été numérisées et ont fait l'objet d'études diverses (amélioration des prédictions, études de niveaux moyens).

L'EPSHOM numérise et archive systématiquement les données récentes relatives aux ports principaux de l'annuaire des côtes de France. Un inventaire en est donné en annexe. Chaque année numérisée pour une station fait l'objet d'un traitement consistant en un calcul de niveaux moyens journalier, mensuel et annuel et en un calcul de constantes harmoniques. Les niveaux moyens sont communiqués au Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) et les constantes harmoniques à la banque de données de l'Organisation Hydrographique Internationale.

2) PSMSL

Le Permanent Service for Mean Sea Level, situé dans les locaux de l'Institute of Oceanographic Sciences à Bidston au Royaume Uni est chargé de recenser et collecter les données de niveau moyen de toutes les stations marégraphiques connues dans le monde.

Le PSMSL est membre de la FAGS (Fédération of Astronomical and Geophysical Services, sous l'égide du IAPSO (International Association for the Physical Sciences of the Ocean).

Les niveaux moyens mensuels et annuels sont expédiés au PSMSL par les autorités nationales, accompagnés de renseignements sur la situation de la station, les jours manquants et le niveau de référence utilisé.

Les données reçues sont contrôlées et si possible rapportées à une référence locale stable (Revised Local Reference ou RLR) ; ceci implique l'identification d'un repère de niveau stable à proximité du marégraphe et la réduction de toutes les hauteurs à un seul niveau de référence permanent rapporté à ce repère. Celui-ci est rapporté au nivellement local indépendamment de l'observation marégraphique, ce qui assure l'homogénéité des données indépendamment des problèmes de nivellement. La banque de données du PSMSL contient des séries provenant de plus de 1 000 stations. Pour 389 d'entre-elles, plus de 20 années sont disponibles et 112 stations ont des observations antérieures à 1900.

Les données sont fournies gratuitement à la communauté scientifique. Elles ont fait l'objet de publication en trois volumes.

- Volume 1 (1976) Europe, Afrique, Inde et Extrême-Orient ;
- Volume 2 (1978) Amérique ;
- Volume 3 (1979) Japon, Philippines, Australie, Iles du Pacifique.

Un catalogue des listages à jour peuvent être fournis sur demande ainsi que les données sur bande magnétique.

Le PSMSL joue également le rôle de coordonnateur pour des projets internationaux tels que MEDALPEX (Mediterranean Alpine Experiment) en 1982, dont le but était d'étudier l'influence atmosphérique sur la dynamique de la Méditerranée Occidentale.

Les études effectuées par le PSMSL comportent des statistiques des variations saisonnières, des variations basse fréquence et des dérives séculaires locales et globales. Elles comportent également l'identification de niveaux extrêmes. Le but est de fournir un produit élaboré qui puisse être comparé directement à des données provenant d'autres sources (climatologie, séismologie).

3) Banque de données de l'OHI

En 1974, le Service Hydrographique du Canada et le Service des données sur le milieu marin du Ministère Canadien des Pêches et des Océans ont entrepris l'établissement et l'exploitation d'une banque informatisée des constantes harmoniques de tous les océans du monde au nom de l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI).

La banque est entrée en service en 1978 et remplace la publication spéciale qui existait auparavant.

La banque est normalement approvisionnée et tenue à jour par les services hydrographiques ou sous leur responsabilité.

Il n'en coûte rien aux Etats membres de l'OHI pour les demandes officielles de toute donnée en banque, mais pour tous les usagers autres que les états membres, il y a un tarif par station.

Plusieurs milliers de stations figurent au fichier, mais la qualité des données est très inégale, de nombreuses stations n'ayant que peu d'observations.

Conclusion

La marégraphie qui était restée inchangée durant des décennies fait l'objet depuis quelques années d'un regain d'intérêt, principalement en raison d'un besoin nouveau de mesures de bonne qualité. Une grande variété de technologies modernes peut lui être appliquée, tant pour la mesure que pour l'acquisition et l'enregistrement des hauteurs et il est probable qu'on trouvera prochainement des marégraphes robustes et précis à des prix raisonnables.

A noter que le besoin nouveau de mesures précises du niveau de la mer émane surtout de la communauté scientifique internationale, alors que les réseaux existants découlent encore essentiellement des besoins de la navigation. Les problèmes d'harmonisation des installations pour satisfaire tous les besoins sont de ce fait non seulement techniques mais également structurels et financiers. Ce dernier aspect ne semble pas encore faire l'objet d'efforts à la hauteur du renouveau technologique en cours.

ANNEXE

OBSERVATIONS DISPONIBLES A L'EPSHOM DEBUT 1985 CONCERNANT LES PORTS
PRINCIPAUX DE L'ANNUAIRE DES MAREES DES COTES DE FRANCE

Port	Début	Fin	Lacunes %	Remarques
Dunkerque	9.08.56	12.01.84	11,6	Lacunes de 288 jours en 1964 et 117 jours en 1971
Calais	4.05.41 26.04.65	14.05.42 24.12.82	18,3 5,3	Lacune de 117 jours en 1979
Boulogne	21.11.41 27.05.75	21.11.42 31.12.82	9,5 5,7	
Dieppe	1.01.54	27.12.82	7,9	Lacune de 331 jours en 1955
Le Havre	4.01.38 22.08.53 1.01.63 18.09.71	1.01.40 2.12.53 5.01.65 27.11.83	0 0 1,3 2,8	
Cherbourg	31.03.43 2.01.63 26.06.74 12.10.78	12.04.44 29.12.63 31.12.77 30.12.83	0 20,1 1,4 4,1	
St Malo	22.06.41 6.10.61 8.08.63 2.01.72	21.04.44 5.4.62 5.08.64 15.08.72	8,9 4,3 0 0	
Héaux de Bréat	1889	1896		Observations à l'échelle des pleines et basses mer. Lacunes nombreuses
Roscoff	7.04.73	1.01.84	7,3	
Brest	2.02.1860 1.01.39 1.01.53	31.7.1937 29.04.44 1.01.84	1,0 0 0,8	Des lacunes apparaissent à partir de 1980
Port Tudy	28.10.66 15.08.75	8.03.67 31.12.83	32,7 4,1	

ANNEXE (suite)

Port	Début	Fin	Lacunes %	Remarques
St Nazaire	1.01.65	31.12.81	5,8	Lacune de 154 jours en 1978
St Gildas	5.12.64 1.08.67	5.02.66 29.12.82	3,4 0,9	
La Rochelle	19.05.41 28.02.67	9.05.44 5.01.80	5,1 19,5	Lacunes importantes : 249 jours en 1968 et 180 jours en 1971
Port de Grave	1.07.63 20.06.67	20.07.64 3.01.78	4,4 19,0	Lacunes importantes en 1969, 1971, 1972 et 1976
Socoa	4.01.64	3.01.83	3,6	
Le Boucau	23.05.67 17.02.76	2.01.72 1.01.83	13,2 3,9	Lacune de 219 jours en 1968
Toulon	1.01.61 29.06.81	30.12.68 16.10.82	12,4 0	

BIBLIOGRAPHIE

- Titre : The development of an ultrasonic tide gauge
Auteur : PARKER (A.G) et al.
Source : Oceans 82, Conference Record, Washington D.C., September 20 - 22, 1982. IEEE Publication 82 CH 1827-5, p. 296-301.
- Titre : Pressure fluctuation on the open ocean floor over a broad frequency range : new program and early results.
Auteur : FILLOUX (J.H.)
Source : Scripps Institution of Oceanography, Contributions, Volume 51, Part 2, 1981, p. P.74 a P.86, 7 fig., 4 tab., 52 réf. (Reprinted from Journal of Physical Oceanography, Vol. 10, N 12, dec. 1980, p 1959 - 1971
- Titre : Report on sea level data collected during the MEDALPEX experiment from September 1981 - Septembre 1982.
Auteur : RICKARDS (L.J.)
Source : Institute of Oceanographic Science, Report N 209, 1985, 170 p -
- Titre : Réseau mondial de stations de mesure du niveau de la mer.
Source : In Commission Oceanographique Intergouvernementale. Rapports des organes directeurs et des principaux organes subsidiaires. Treizième session de l'Assemblée, Paris 12 - 28 mars 1985 - Paris : UNESCO, 1985. IOC - XIII/3 p. 48-49
- Titre : On determining the large-scale ocean circulation from satellite altimetry
Auteur : TAI (C.K.)
Source : Journal of Geophysical Research, vol. 88, NC. 14, November 20, 1983, p. 9553-9565, 8 fig., 1 tabl., 33 ref.
- Titre : Floods due to high winds and tides. Proceedings of a conference held at the University of Bristol on January 9, 1980/by the Environmental Mathematics Group of the Institute of Mathematics and its applications.
Auteur : PEREGRINE (D.H.)
Source : London : Academic Press, 1981. - 106 p. ; 24 cm. - (The Institute of Mathematics and its applications Conference Series). ISBN 01-12-551820-X.
- Titre : Observations du niveau moyen oceanique
Auteur : VERSTRAETE (J.M.)
Source : Focal Information N4, octobre 1983, p. 1-4, 2 fig.-
- Titre : Operational sea-level stations.
Source : UNESCO, Intergovernmental Oceanographic commission, technical series N 23, 1983, 40 p.-

Titre : Long-term sea level measurements : a Global Catalogue.
Auteur : LUTJEHARMS (J.R.E.), ALHEIT (M.M.)
Source : Council for Scientific and Industrial Research,
Stellenbosch, South Africa, CSIR technical Report T/SEA
8210, July 1982, 99 p.

Titre : Sea-Level in the world ocean. Part 1 : the North-East
Atlantic Ocean. Part 2 : the North-West Pacific Ocean. Part
3 : the North-West Atlantic Ocean. Part 4 : the
Mediterranean Sea. Part 5 : the South Pacific Ocean. Part
7 : the Indian Ocean.

Auteur : LUTJEHARMS (J.R.E.), ALHEIT (M.M.)
Source : Council for scientific and Industrial Research, South
Africa, Report CSIR T/SEA 8303, August 1983 - 7 fasc.

Titre : Storm-surge forecasting for the East and West coasts of the
British Isles : scientific development and practical method

Auteur : HEAPS (N.S.)
Source : in : First international conference on meteorology and
air/sea interaction of the coastal zone, The Hague,
Netherlands 10 -4 May 1982. - boston, Massachusets :
American meteorological Society, 1982 - p. 219 -234, 26
fig. ; 23 réf.

Titre : Times series methods in hydrosiences : proceedings of an
international conference held at Canada Centre for inland
waters, Burlington, Ontario, Canada, October 6-8, 1981

Auteur : EL-SHAARAWI (A.H.) ESTERBY (S.R.)
Source : Amsterdam : Elsevier, 1982 - X-614 p. (Developments in
water science ; 17) ISBN 0-444-42102-5.

Titre : Parametrizing extreme still water levels and waves in
design level studies

Auteur : ALCOCK (G.A.)
Source : Institute of Oceanographic Sciences Report N 183, 1984,
95 p.

Titre : Programme de mise en oeuvre d'un système d'observation des
océans : plan d'action du programme mondial de recherche
sur le climat

Source : UNESCO, Commission océanographique intergouvernementale,
série technique, N 27, 1984 - 31 p.

Titre : Inclusion of tidal parameters in satellite altimetry
adjustment model.

Auteur : BIAHA (G.), HADGIGEORGE (G.), ROONEY (T.)
Source : Marine Geodesy, Vol. 9, N 3, 1985, p. 263-289, 1 fig., 13
réf. -

Titre : Special issue : geodetic features of the ocean surface and
their implications

Auteur : LONGAREVIC (B.D.)
Source : Marine Geophysical Researches, Vol. 7, N 1/2, 1984, p. 1-
327.

Titre : Manual on sea level measurement and interpretations
Source : Paris : UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission,
1985 - 83 p.- (Manuals and Guides ; 14).

LISTE DE DIFFUSION

Diffusion interne :

- SHOM
- EPSHOM
- EPSHOM/E
- EPSHOM/E/DA (3)
- EPSHOM/E/OC (10)
- EPSHOM/IS

Diffusion externe :

- CEDOCAR (2 ex)
Centre de Documentation de l'Armement.
26, Boulevard Victor
75996 PARIS ARMEES
- INSTITUT GEOGRAPHIQUE NATIONAL (M. BOUCHER)
2, Avenue Pasteur
94160 SAINT-MANDE
- ORSTOM (M. VERSTRAETE)
Institut Océanographique
Rue Saint-Jacques
75005 PARIS

